

Fluidisation d'un lit granulaire étendu par une source localisée

Kouakou Kouamé, Farzam Zoueshtiagh & Alain Merlen

Laboratoire de Mécanique de Lille UMR CNRS 8107
Bd P. Langevin 59655 Villeneuve d'Ascq
Farzam.Zoueshtiagh@univ-lille1.fr

Résumé :

Ce papier porte sur l'étude théorique, numérique et expérimentale de la réponse d'un lit granulaire étendu soumis à un jet liquide, ponctuel vertical et ascendant. Un régime poreux, un régime de transition et un régime de fluidisation locale du lit au dessus de l'injection ont pu être observés en fonction du débit d'écoulement. Les effets de confinements ont été étudiés théoriquement et numériquement pour le régime poreux. La fluidisation est décrite par un modèle théorique simple qui donne des résultats satisfaisants par rapport aux résultats expérimentaux. Le régime transitoire, considéré comme une fluidisation partielle au voisinage de l'injection, est étudié expérimentalement à travers un dispositif à deux dimensions.

Abstract :

The response of a granular bed to the presence of a punctual and vertically flowing water jet is studied experimentally, theoretically and numerically. Experiments show that depending on the flow rate, a porous regime, a transitional or a fluidized regime affect the bed's behavior. Wall effects on the flow motion inside the bed in the porous regime is studied theoretically and numerically. The fluidization of the bed is described by mean of a simple theory which gives good agreement with experiments. The transitional regime, considered as partial fluidization of the bed nearby the water jet, is experimentally studied with a two dimensional cell.

Mots-clefs :

Lits fluidisés ; écoulements de Darcy ; écoulements diphasiques

1 Introduction

Une fluidisation se produit lorsqu'un ensemble de particules solides agrégées est mis en mouvement dispersé sous l'effet d'un écoulement. La fluidisation de matrices granulaires est couramment utilisée dans différents domaines de l'industrie dans le but d'obtenir, par exemple, des mélanges, transporter des particules [Rhodes (1998); Vogt *et al.* (2005); Peng *et al.* (1997); Soo (1967)] ou comme moyen de dragage des rivières [Weisman *et al.* (1994, 1988); Lennon *et al.* (1995); Law (1995)]. On retrouve également la fluidisation dans des milieux naturels où elle peut être responsable des érosions souterraines [Lobkovsky *et al.* (2004); Owoputi *et al.* (2001); Schorghofer *et al.* (2004)].

On s'intéresse ici à un cas particulier de fluidisation en milieu naturel où il n'est pas rare d'observer des sources localisées sous des lits granulaires. Dans le cas où cette remontée d'eau se fait dans un environnement sableux, une fluidisation partielle de la matrice sableuse peut alors se produire [Zoueshtiagh *et al.* (2007)]. L'objectif principal de ce travail est de caractériser cette situation à travers une étude sur les effets d'un jet d'eau ponctuel, vertical et ascendant placé sous un lit granulaire.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (fig.1) se compose d'un réservoir cylindrique en plexiglas de 24 cm de diamètre et 17 cm de hauteur. Le fond du réservoir est un disque, amovible suivant la direction verticale. On appelle S la hauteur de matrice granulaire et W celle de la couche d'eau. La surface libre

est à la pression atmosphérique. Le centre du disque est percé d'un orifice où vient se loger une buse. Le diamètre de la buse définit la taille de l'injection. Trois buses de diamètres d'injection différents d_i (3 mm, 15 mm, 35 mm) sont utilisées pour les expériences.

L'ensemble du système est relié à un débitmètre mesurant le flux d'écoulement. Les matrices granulaires sont formées de grains de sable ou de billes de verre de diamètres moyens respectifs $350\ \mu\text{m}$ et $1000\ \mu\text{m}$ et de masses volumiques avoisinant $2.65\ \text{gcm}^{-3}$. Les mesures s'effectuent en augmentant progressivement le débit d'écoulement et en observant le comportement de la matrice grâce à une caméra CCD à la fréquence d'acquisition de 25 images par seconde.

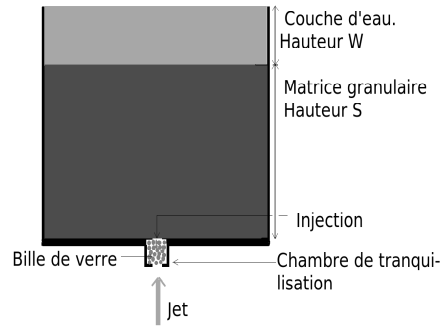


FIG. 1 – Représentation schématique du dispositif expérimental.

3 Observations expérimentales et résultats

Trois régimes (i), (ii) et (iii) ont été mis en évidence en fonction du débit Q . Le régime (i) correspond à de faibles valeurs de Q où aucune déformation du lit n'est observée. Le lit demeure immobile et est assimilé à un milieu poreux. A l'interface eau-air, l'eau s'écoule hors du dispositif dans un mouvement quasi-permanent. Le régime (ii) se caractérise par une excroissance du lit à l'interface eau-lit, dans la zone située au dessus de l'injection. Enfin le régime (iii) correspond à des débits importants qui provoquent une fluidisation locale dans toute l'épaisseur du lit (cheminée) au dessus de l'injection. Les expériences montrent la présence d'un hystérésis lorsque la cheminée préalablement fluidisée, est lentement défluidisée par diminution de Q . La figure 2 montre les débits seuils de fluidisation, Q_f , et de défluidisation, Q_d , pour différentes hauteurs de grains.

La taille de la cheminée a été mesurée pour différents débits et différents diamètres d'injection (figure 3). Les résultats montrent que près du seuil de fluidisation la cheminée a une forme

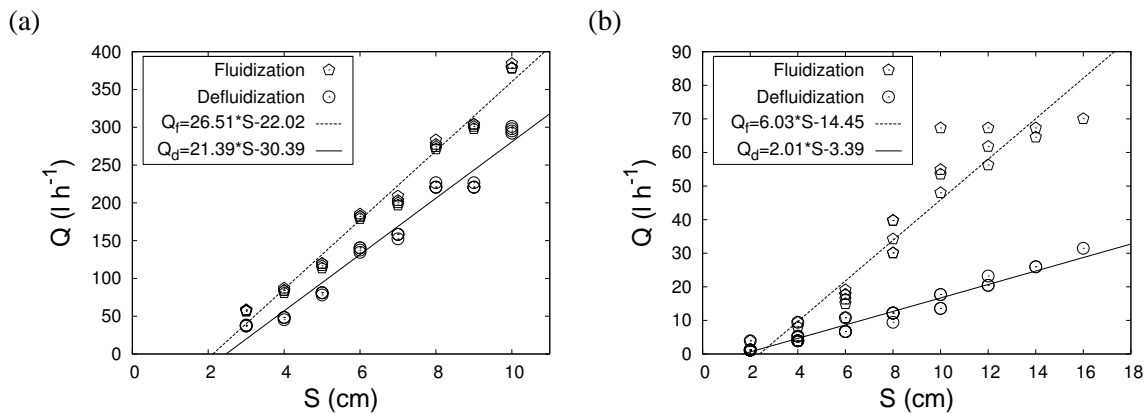


FIG. 2 – Seuils de fluidisation et de défluidisation (a) de grains de sable (b) de billes de verre.

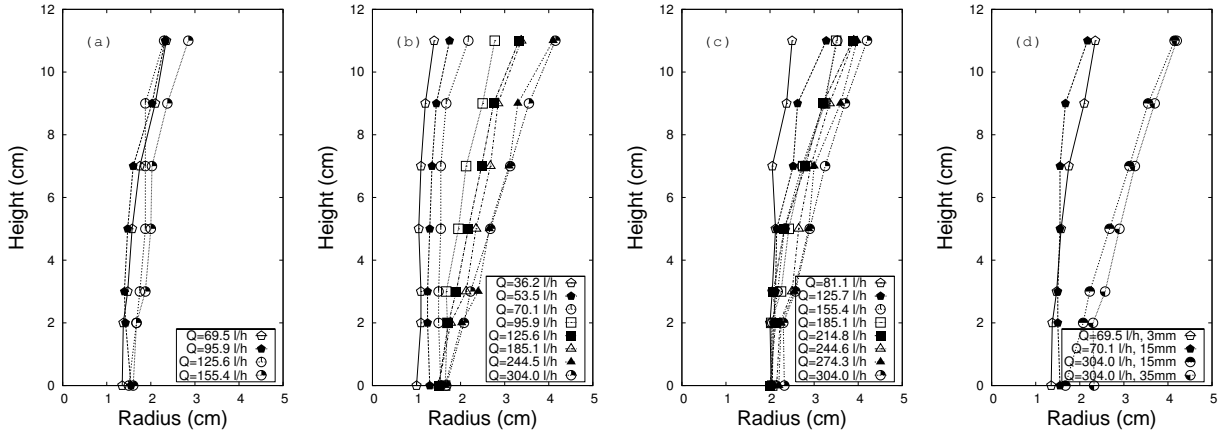


FIG. 3 – Taille et le profil de la cheminée en fonction du débit pour des buses de diamètre (a) 3 mm (b) 15 mm (c) 35 mm. (d) comparaison de profils obtenus avec différentes buses à des débits équivalents.

quasi-cylindrique tandis qu'elle s'évase lorsque Q augmente. De plus le diamètre de l'injection paraît avoir un effet négligeable sur le diamètre de la cheminée.

4 Analyse et discussion

Le régime (i) a été modélisé théoriquement en supposant, d'une part, une condition d'incompressibilité du liquide et d'autre part, une pression constante à l'interface eau-lit. Ces hypothèses s'appuient sur les observations expérimentales i.e. l'immobilité du lit et l'éjection quasi-stationnaire du liquide hors du dispositif. L'écoulement à travers la matrice granulaire peut alors être modélisé par la loi de Darcy $\vec{u} = -k_d \vec{\nabla} \hat{p}$ où \vec{u} représente la vitesse de Darcy, k_d la perméabilité de la matrice et \hat{p} la pression motrice. L'hypothèse d'incompressibilité implique que \hat{p} est solution de l'équation de Laplace, $\Delta \hat{p} = 0$. La solution théorique pour une injection ponctuelle en milieu infini donne une valeur du débit en tout point du lit s'exprimant par la relation $Q = \frac{\hat{p}}{2\pi k_d R_s}$, où R_s exprimée en coordonnées sphériques, représente la distance de la source à un point de l'interface eau-lit. Ainsi, en tout point de l'interface, la vitesse verticale ascendante du fluide à la sortie du lit est donnée par l'expression $u = u_{max} (1 + r^2/S^2)^{-3/2}$, où $u_{max} = \frac{Q}{2\pi S^2}$ est la vitesse maximale et r représente la distance à l'axe de symétrie de la cellule.

Afin d'évaluer l'influence du confinement sur les écoulements dans la matrice, des simulations numériques ont été entreprises. Le domaine de calcul est considéré comme une boîte axisymétrique soumise à un jet central à vitesse uniforme. On résout le problème $\Delta \phi = 0$ pour un potentiel de vitesse $\phi = k_d \hat{p}$ où k_d est constante. L'équation de Laplace est discrétisée par la méthode des différences finies centrées et résolue par la méthode itérative S.O.R. (successive over relaxation). Les conditions limites sont de type Dirichlet à l'interface $\hat{p} = 0$ et de type Neumann sur l'axe vertical $u = -k_d \frac{\partial \hat{p}}{\partial r} = 0$, sur les parois de la cellule $u = -k_d \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} = 0$ et enfin pour l'injection $u = -k_d \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} = 4 \frac{Q}{\pi d_i^2}$. Les prédictions des modèles théoriques et numériques sont confrontées à des mesures expérimentales des vitesses du fluide à la surface du lit (figure 4). L'analyse des résultats de la figure 4 montre que la concordance entre les résultats fournis par les modèles théoriques, numériques et les résultats expérimentaux dépend de la hauteur S du lit. Pour $S = 3$ cm on note un écart significatif entre les différents résultats près de l'axe où les effets de l'injection sont prépondérants. Les écarts s'amenuisent lorsque la hauteur de lit augmente. Ces graphes montrent qu'il faut des rapports d'aspect $\frac{d_i}{S} \leq 0.2$ et $\frac{S}{R_e} \approx 0.6$ pour pouvoir considérer l'intrusion comme une source ponctuelle distribuant le fluide à travers un milieu infini.

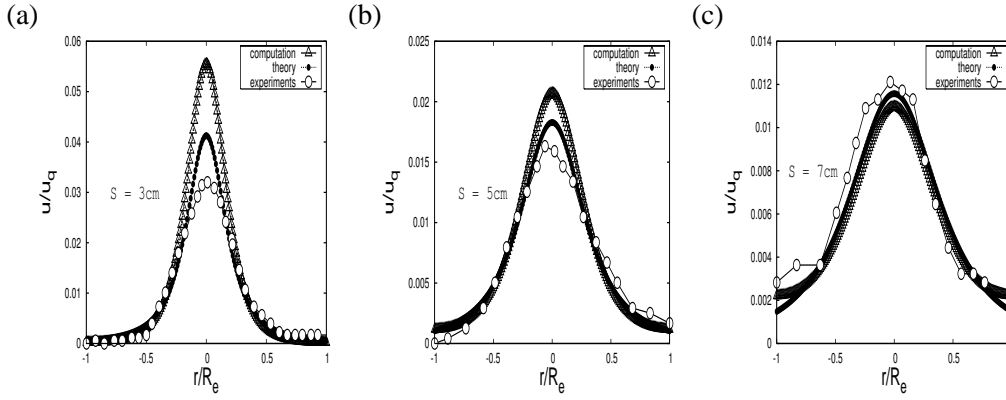


FIG. 4 – Comparaison entre les profils de vitesses théoriques, numériques, expérimentales à l'interface eau-lit dans le régime (i). (a) $S = 3 \text{ cm}$, (b) $S = 5 \text{ cm}$, (c) $S = 7 \text{ cm}$. Sur ces graphes les vitesses u et la distance à l'axe de symétrie de la cellule r sont respectivement adimensionnées par la vitesse débitante et le rayon de la cellule R_e . Expériences menées avec des billes de verre.

Pour le régime (iii), un modèle possible pour représenter la fluidisation de la cheminée est celui de l'ascension en bloc du cylindre granulaire de base Σ_f et de hauteur égale à celle du lit (S). La condition de fluidisation peut être alors décrite par $\Delta\hat{p}\Sigma_f > \alpha\rho_a S\Sigma_f g + \Delta\hat{p}\mu_s\Sigma_f$, où α est la fraction volumique des grains, g l'accélération de la pesanteur, μ_s le coefficient de frottement sec et ρ_a la différence de masse volumique entre les grains et l'eau. Cette équation traduit simplement la prépondérance de la force de poussée due à la différence de pression entre le haut et le bas du cylindre sur le poids effectif de la cheminée auquel s'ajoute la force de frottement statique localisée aux parois du cylindre. Pour la modélisation nous considérons le débit de fluidisation Q_f comme la somme du débit à travers la cheminée Q_{vd} et du débit dans le domaine non fluidisé Q_p .

A la limite de la fluidisation cette force de poussée sur le bloc granulaire égale le poids des grains et la force de friction aux parois. Cette égalité apporte l'expression de la différence de pression entre le haut et le bas du bloc $\Delta\hat{p} = \frac{\alpha\rho_a g S}{1-\mu_s}$, donnant ainsi le débit à travers la cheminée $Q_{vd} = k_D \Sigma_d \Delta\hat{p} = k_D \Sigma_d \frac{\alpha\rho_a g S}{1-\mu_s}$. En ce qui concerne le débit dans la partie extérieure au cylindre nous pouvons utiliser le modèle du régime (i) toujours valable à cette limite de fluidisation, ce qui donne une pression motrice $\hat{p} = \frac{Q_p}{2\pi k_d \sqrt{(r^2 + (z+S)^2)}}$ où z est la distance verticale par rapport à la source. Le débit de fluidisation

s'exprime alors sous la forme $Q_f = k_D \Sigma_d \frac{\alpha\rho_a g S}{1-\mu_s} + 2\pi k_d \sqrt{(r^2 + (z+S)^2)} \frac{\alpha\rho_a g S}{1-\mu_s}$. Par un raisonnement analogue mais en négligeant les forces de frottements aux parois on obtient l'expression du débit au seuil de défluidisation $Q_d = 2\pi k_d \sqrt{(r^2 + (z+S)^2)} + k_D \Sigma_d \alpha \Delta\rho g$. Le rapport entre ces deux seuils est égal à $Q_f/Q_d = 1/(1-\mu_s)$. En mesurant le coefficient de frottement des particules par la méthode du tambour tournant [voir e.g. Duran (1997)] on trouve le rapport Q_f/Q_d égal à 2.8 et 2 respectivement pour les grains de sable et les billes de verre. Ces rapports sont en relatif bon accord avec les résultats expérimentaux où, d'après les graphes de la figure 2, on obtient respectivement $Q_f/Q_d \approx 3$ et $Q_f/Q_d \approx 1.24$ pour les grains de sable et les billes de verre.

La modélisation simpliste du régime (iii) suppose implicitement un passage direct du régime poreux au régime fluidisé. Or, expérimentalement nous avons observé la déformation du lit avant toute fluidisation. Ce régime (ii) de transition correspond probablement à une fluidisation partielle du lit au voisinage de la source d'injection. Afin d'étudier ce régime une cellule expérimentale à deux dimensions a été construite. La cellule se compose de deux plaques de verre parallèles, de largeur 25 cm et de hauteur 20 cm et distantes de 2 cm. La base de la cellule est percée en son centre d'un orifice de 3 mm de diamètre par lequel le fluide entre en contact avec la matrice granulaire. A partir d'un certain débit, l'injection du fluide provoque, dans la matrice, la formation d'une arche au voisinage

de l'orifice sous laquelle des grains sont en mouvement (fig 5(a)). La naissance de cette dernière est concomitante au renflement observé à la surface du lit. Cette arche conserve sa taille et sa position tant que la valeur du débit pour laquelle elle apparaît reste inchangée. La présence de cette zone fluidisée au voisinage de l'injection témoigne en partie de l'état du régime (ii) de transition dans l'expérience tridimensionnelle.

Une augmentation de Q , entraîne l'augmentation progressive de la taille de l'arche qui, ensuite, se "détache" de l'intrusion pour effectuer une remontée du lit. Pendant son ascension, elle passe d'une forme approximativement sphérique près de l'intrusion à une forme ellipsoïdale par un étirement suivant la direction transversale. Au cours de sa remontée, l'arche provoque en aval la fluidisation du lit. La taille de la zone fluidisée est environ la taille de l'arche. Cependant, la zone antérieurement fluidisée, située plus en profondeur par rapport à l'arche, se rétrécit progressivement jusqu'à atteindre une taille fixée par le débit donné. La fluidisation complète i.e. la création de la cheminée, est obtenue quand l'arche atteint la surface du lit.

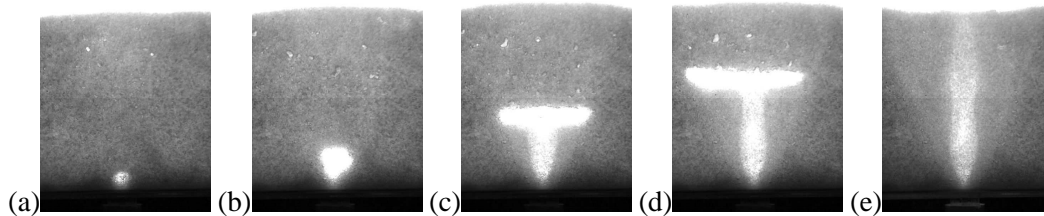


FIG. 5 – Étapes de fluidisation de la matrice granulaire. (a) : l'arche au voisinage de l'intrusion. $Q = 27.55 \text{ lh}^{-1}$. (b)-(d) : Images successives de l'évolution de l'arche jusqu'à la fluidisation $Q = 89.97 \text{ lh}^{-1}$. Les expériences sont réalisées pour une hauteur de lit $S = 15 \text{ cm}$

Afin de visualiser avec précision la taille de la cheminée nous avons procédé à un traitement d'images. Ce dernier consiste à déceler les zones où les grains sont en mouvement en effectuant une différence entre deux images prises à des instants différents. Le résultat d'un tel traitement est montré sur la figure 6. La zone claire correspond au domaine où des mouvements de grains ont lieu tandis que la zone noire représente la partie immobile du lit. On constate que pour des débits légèrement supérieurs au débit seuil de fluidisation la cheminée adopte une forme approximativement cylindrique (fig. 6(a)) puis prend une forme conique pour des débits plus importants (fig. 6(c)). Ce résultat confirme les observations faites sur la forme de cheminée lors des expériences en 3D.

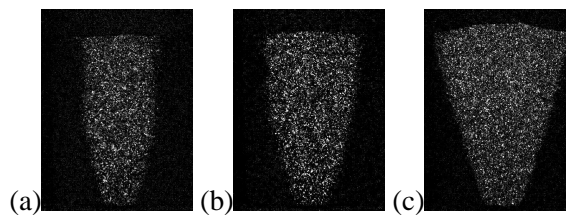


FIG. 6 – Profils de la cheminée pour des débits croissants. (a) $Q = 97.41 \text{ lh}^{-1}$, (b) $Q = 110,78 \text{ lh}^{-1}$ (c) $Q = 161.32 \text{ lh}^{-1}$. $S = 15 \text{ cm}$.

5 Conclusion

Un dispositif expérimental a permis de mettre en évidence l'influence de la taille, de la forme et de la position d'un jet ponctuel sur le comportement global d'un lit étendu. Trois régimes ont pu

être observés : un régime de pré-fluidisation où la matrice granulaire s'apparente à un milieu poreux confiné, un régime transitoire caractérisé par une fluidisation partielle au voisinage de l'injection et enfin un régime de fluidisation locale de la matrice au dessus du jet créant une cheminée d'écoulement à travers toute l'épaisseur du lit.

Les résultats montrent que le seuil de fluidisation ainsi que la taille de la zone cylindrique fluidisée sont indépendants de la section d'injection. Sur le plan théorique, un modèle du premier régime prédisant l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux s'appuyant sur la loi de Darcy a permis d'éclaircir l'influence des conditions de confinement par comparaison avec des simulations numériques. La comparaison entre la théorie, le numérique et les expériences a permis de définir des rapports d'aspect jet/cylindre et matrice/cylindre à partir desquels le système peut être considéré comme équivalent à une source ponctuelle sous un lit granulaire de dimension infinie.

Références

- Duran, J. 1997 Sables, poudres et grains. *Eyrolles Sciences*, Paris, France.
- Peng, Y., Fan, L.T. 1997 Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid-solid tapered beds. *Chem. Engng. Sci.* **52**, 2277-2290
- Law, A.W.K. 1995 Incipient fluidization of fine sand in Deep Seabed. *J. Hydr. Engng.* **121**, 653-656
- Lennon, G.P., Weisman, R.N. 1995 Head Requirement for incipient fluidization of fine sands in unbounded domains. **121**, 838-841
- Lobkovsky, A.E., Jensen, B., Kudrolli, A., Rothman, D.H. 2004 Threshold phenomena in erosion driven by surface flow. *J. Geophys. Res., EarthSurface*, **109**, F04010
- Owoputi, L.O., Stolte, W.J. 2001 The role of seepage in erodibility. *Hydrological Processes* **15**, 13-22
- Rhodes, M.J. 1998 Introduction to particle technology. (*John Wiley & Sons*), Chichester, England, UK.
- Schorghofer, N., Jensen, B., Kudrolli, A., Rothman, D. H. 2004 Spontaneous channelization in permeable ground : theory, experiment, and observation. *J. Fluid Mech.* **503**, 357-374
- Soo, S.L. 1967 Fluid Dynamics of Multiphase Systems. *Blaisdell Publishing Company*, Waltham, Massachusetts, USA
- Vogt, C., Schreiber, R., Brunner, G., Werther, J. 2005 Fluid Dynamics of the Supercritical Fluidized Bed. *Powder Technology* **158**, 102-114
- Weisman, R.N., Lennon, G. P. 1994 Design of fluidizer systems for coastal environment. *J. Water, Port, Coast, and Oc. Engrg., ASCE*, **120**, 468-487
- Weisman, R.N., Lennon, G.P., Roberts, E.W. 1988 Experiment on fluidization in unbounded domains. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, **114**, 502-515
- Zoueshtigh, F., Merlen, A. 2007 Effect of a vertically-flowing water jet underneath a granular bed. *Phys. Rev.E*, accepted, in press.